

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

銀河宇宙線中の超重核成分観測のための
高性能固体飛跡検出器の開発

Development of high performance solid state track detector for the
observations of ultra heavy nuclei in galactic cosmic rays

申 請 者

小 平	聡
Kodaira	Satoshi

物理学及応用物理学専攻・宇宙放射線物理学研究

2007 年 5 月

銀河内を飛び交う高エネルギー宇宙粒子線（銀河宇宙線）が初めて観測されてからおよそ100年が経過しようとしている。これまでの宇宙線研究は、新粒子の発見や加速器では実現できない高エネルギー物理学実験、また近年では天文学と関連して高エネルギー宇宙物理学として発展してきた。高エネルギー宇宙線中の原子核成分が占めるエネルギーの割合は全体の約1/3にも達し、宇宙で織りなす様々な高エネルギー現象と密接な関係を持っている。これまでいろいろな観測手段によって、宇宙線中に含まれる多様な原子核成分（原子番号 $Z \leq 30$ ）とそのエネルギースペクトルが観測され、宇宙線の本質に関する多くの知見が得られた。しかしながら、宇宙線の起源がどこにあるのか、また何処でどの様にして高エネルギーにまで加速されたのか、未だ明確な解が得られてないのが現状である。本研究は、宇宙線中の $Z \geq 30$ の超重核成分を観測する研究と密接に関連する。これらの宇宙線は、高エネルギー天体現象の重要な情報を運んでくる極めて有用なメッセンジャーである。しかし、これらの銀河宇宙線を観測することは決して容易ではない。超重核成分を同定する観測技術上の難しさ、また、それらのフラックスが極めて微量である、ことに起因するからである。同位体を含めた超重核成分の高精度な宇宙線観測は、残された数少ないフロンティア研究の一つである。

宇宙線中の超重核成分はこれまでに人工衛星や気球等で観測されてきたが、全て核電荷のみで、それらの同位体についての観測は皆無である。超重核成分を高精度で観測するためには、大面積化が不可欠であり、かつ優れた粒子識別能力を有する高性能な検出器が要求される。そのような宇宙線検出器として固体飛跡検出器に着目し、開発に着手した。大面積で高性能な固体飛跡検出器は、これまで宇宙線超重核観測を妨げてきた状況にブレークスルーをもたらすものである。そして、長時間気球あるいは国際宇宙ステーションを利用して、宇宙線中の超重核を高精度で観測する将来計画を目指している。本論文は、そのような宇宙線観測のための高性能固体飛跡検出器の開発とその解析技術の開発で得られた研究成果について述べた。

本論文は全8章から構成され、以下に各章の概略を述べる。

第1章では、宇宙線物理学に残された研究課題を明確にし、それらを解決するための有力な手段としての超重核成分観測の重要性と科学的意義、期待される科学的成果について論じた。ウラン、トリウム等のアクチノイド元素に至る超重核（ $Z \geq 30$ ）の同位体成分を含めた詳細な化学組成を確定することで、銀河宇宙線の起源や寿命、粒子加速や輸送機構の解明、銀河物質の歴史や星内元素合成過程と宇宙線との関係を明確にすることができる。このように、超重核観測は宇宙線研究において最重要な研究課題であることを示した。高精度な超重核成分の観測的研究によって得られる知見により、宇宙線研究の一層の発展、また宇宙核物理学等の周辺分野への拡大と発展を促進することができる。

第2章では、これまでの宇宙線中の原子核成分の観測現状とその問題点について述べ、この議論に基づき宇宙線超重核の高精度観測を可能にする高性能固体飛跡検出器の必要性について述べた。ACE衛星により、 $Z \leq 30$ の同位体を含めた原子核成分の観測が高精度で実施され、宇宙線の軽元素の起源や加速時期、寿命に関する知見が得られた。一方、 $Z \geq 30$ の原子核成分の観測はHEAO-3等の飛翔体により実施されたが、核電荷成分のみで同位体成分の観測は行われてない。また、統計量と検出器の粒子識別能力の不足のために、観測データから宇宙線源について議論するに困難である。将来計画では、高い統計精度を確保するための観測装置の大面積

化と高い粒子識別能力をもつ検出器の開発が必須である。本研究では固体飛跡検出器がこれらの点で優れた特性を示すことに着目し、超重核観測計画の検出器として最有力候補とした。固体飛跡検出器は電力を必要としない受動型放射線検出器であり、安価で軽量の検出器として容易に大面積展開することができる。本研究では、そのような高性能固体飛跡検出器の研究開発を目的とした。

第3章では、固体飛跡検出器の発展の歴史を辿りつつ、これまでに原子核成分の観測に使用された種々の粒子線検出器の比較をすると共に、超重核観測に固体飛跡検出器を用いる長所と解決すべき4つの問題点について述べた。1970年代には、既に固体飛跡検出器は宇宙線超重核探索において有力な検出器として認識され、気球や人工衛星等に載せた観測実験が行われた。しかしながら、① 従来の固体飛跡検出器の質量及び電荷分解能は十分でなかった、② 観測環境（宇宙線曝露時の温度や真空度）に対する固体飛跡検出器に特有な性質（入射角度の依存性など）に関する研究が十分行なわれていなかった、③ 粒子検出の閾値を超重核（ $Z \geq 30$ ）に持つ固体飛跡検出器が存在しなかった、④ 光学顕微鏡を用いた固体飛跡検出器の解析では膨大な時間と労力が必要とされた。これらの点が大きな障害となり期待された成果を得てないのが現状であった。

第4章では、CR-39 プラスチック固体飛跡検出器の鉄核に対する質量分解能を劇的に改善することに成功し、その成果について述べた。CR-39 では荷電粒子の通過に伴って放出される高エネルギー δ 線のゆらぎの影響を受けないために、原理的には半導体検出器に匹敵する高い質量分解能（ < 0.20 amu 程度）が期待されるが、Hayashi 等が1982年に示した鉄核に対する質量分解能は、 0.34 amu という不十分な結果であった。これは固体飛跡検出器の応答感度の不均一性によるものと解釈された。本研究では、高純度モノマーの一樣性が著しく向上した CR-39 を用いるだけでなく、CR-39 の質量分解能決定に重要な要素である、表面検出精度と厚さ測定精度による系統誤差に問題点があり質量分解能を劣化させている大きな原因であることを突き止めた。そこで、系統誤差を極力排除できる解析システムの開発を行い、表面検出精度と厚さ測定精度を大幅に向上させることに成功した。その結果、CR-39 による鉄核に対する質量分解能として 0.22 ± 0.03 amu を達成することができた。これは従来の質量分解能（ 0.34 amu）を遥かに凌ぎ、更に多重平均測定によりランダム誤差を排除することを通じ、最終的には ~ 0.10 amu の質量分解能を得られることを示した。これにより CR-39 を用いる宇宙線同位体観測装置で、超重核の同位体成分が明確に弁別できることを初めて実験的に示した。

第5章では、CR-39 固体飛跡検出器に対する重荷電粒子の照射時の環境変動と入射角度による感度応答の依存性について述べた。宇宙線観測時は環境変動等が予測されるが、重粒子照射時の温度、圧力、入射角度に対する CR-39 応答感度の依存性に関するデータを、重イオン加速器ビームを利用して詳細に取得した。温度変動に伴う CR-39 の感度応答はおよそ -60°C から -30°C の間ではほぼ安定であること、圧力変動による応答感度はおよそ 100 Torr 以上ではほぼ安定であること、そして入射角度に対する感度応答は観測後に補正可能であること、を実験的に明らかにした。即ち、観測時の環境変動に対する制御パラメータを本研究で初めて示した。そ

の結果、宇宙実験あるいは気球実験の設計と環境変動に対して対策を立てることが可能となった。固体飛跡検出器を用いた従来の宇宙線観測では、これらのことが十分に考慮されていなかったことから、信頼性の高いデータが得られてなかった。

第6章では、宇宙線超重核 ($Z \geq 30$) のみを選択的に検出することの出来る CR-39-DAP 共重合体検出器について述べた。これまで宇宙線観測に用いられてきた代表的な固体飛跡検出器として CR-39 とレキサンが挙げられる。CR-39 は相対論的エネルギーにある $Z=6$ に検出閾値を持ち非常に高感度である。そのために、宇宙線強度が極めて高い鉄核等の軽粒子がバックグラウンドとなり、解析上大きな支障となる。一方、レキサンは $Z=65$ に検出閾値を持つが、電荷分解能が非常に悪い。これまで $Z \geq 30$ 以上に検出閾値を有し、且つ優れた粒子識別能力を有する固体飛跡検出器は存在しなかった。そこで、本研究では優れた質量分解能を有する CR-39 を基材として DAP (diallyl phthalate) を共重合させた新しい固体飛跡検出器の開発に成功した。両者の組成比を変え共重合させることで、CR-39 の優れた特性を維持しながら、検出可能な電荷閾値を制御することに成功した。従って、この新しい固体飛跡検出器開発に成功したことにより、超重核観測では軽粒子バックグラウンドを大幅に低減することができることを、明らかにした。

第7章では、本研究で達成した CR-39 による質量分解能、検出器特性、閾値可変型の核電荷検出器の開発、大面積固体飛跡検出器の高速化、高精度解析システムの構築、により実現可能となった宇宙線超重核の高精度観測の将来計画と期待される科学的成果について述べた。① 0.22 amu 以下の質量分解能が達成できたことにより、宇宙線中の超重核の同位体成分が明確に弁別できる。② 観測環境の変動や入射角度に対する検出器感度の依存性を明らかにした。③ CR-39-DAP 共重合体の新素材検出器の研究開発により、核電荷の閾値可変型の新しい検出器の開発に成功した。その結果、宇宙線観測では、鉄核などの軽粒子によるバックグラウンドを大幅に低減することができる。④ 固体飛跡検出器の読み出し及び解析装置として、高速顕微鏡システムと高精度測定技術を実現することができた。その結果、宇宙線観測において大面積固体飛跡検出器の迅速な解析処理が実現可能となった。以上のことから、これまで達成し得なかった宇宙線超重核の高精度観測が初めて実現可能となった。

第8章では、本研究で得た高性能 CR-39 固体飛跡検出器の開発研究の結果について包括的にまとめ、最後に今後の展望について述べた。本研究によって望まれながらもこれまで達成し得なかった宇宙線超重核の高精度観測が初めて実現可能となった。また、本研究により得られた新素材検出器の開発成果は宇宙線観測のみならず、宇宙船内の被ばく線量測定、重イオン加速器施設の遮蔽やがん治療等の先端医療、など多様な分野への応用が期待される。また、高速・高精度解析システムは、重イオンを利用する様々な分野に応用でき、重イオン科学の発展に貢献できるものと期待されている。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
査読付き 論文誌	<p>○ S. Kodaira, N. Yasuda, N. Hasebe, T. Doke, S. Ota, M. Sato, H. Tawara and K. Ogura, "Improvement of mass resolution for iron isotopes in CR-39 track detector", Jpn. J. Appl. Phys., (掲載決定) .</p> <p>○ S. Kodaira, M. Asaeda, T. Doke, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Ogura, N. Yasuda, T. Tsuruta and Y. Kori, "Track detector of CR-39-DAP-copolymer with variable threshold to detect trans-iron nuclei in galactic cosmic rays", Radiat. Meas., (投稿中) .</p> <p>N. Yasuda, D.H. Zhang, S. Kodaira, Y. Koguchi, I. Kobayashi, M. Kurano and D. Shu, "Verification of angular dependence for track sensitivity on several types of CR-39", Radiat. Meas., (投稿中) .</p> <p>○ S. Kodaira, N. Yasuda, N. Hasebe, T. Doke, S. Ota and K. Ogura, "New method of the precise measurement for the thickness and bulk etch rate of the solid-state track detector", Nucl. Instr. & Meth., A574 (2007) 163-170.</p> <p>B.A. Weaver, A.J. Westphal, N. Yasuda and S. Kodaira, "Progress in laboratory performance verification of the R-process Isotope Observer", Adv. Space Res., 37 (2006) 1960-1965.</p> <p>○ S. Kodaira, M. Hareyama, N. Hasebe, T. Miyachi, K. Sakurai, W.R. Binns, J.R. Cummings, M.H. Israel, J.T. Link, B.F. Rauch, L.M. Scott, S. Geier, R.A. Mewaldt, L.M. Barbier, J.W. Mitchell, G.A. de Nolfo, R.E. Streitmatter and C.J. Waddington, "The attenuation length of cosmic ray iron in the atmosphere obtained by TIGER experiment", Int. J. Mod. Phys., A20 (2005) 6702-6704.</p> <p>N. Hasebe, M. Hareyama, S. Kodaira and K. Sakurai, "Are Galactic Cosmic Rays Accelerated inside the Ejectae Expanding just after Supernova Explosions?", Nucl. Phys., A758 (2005) 292c-295c.</p> <p>○ S. Kodaira, N. Hasebe, T. Doke, A. Kitagawa, H. Kitamura, S. Sato, Y. Uchihori, N. Yasuda, K. Ogura and H. Tawara, "Mass Resolution for Iron-Isotopes in CR-39 Track Detector", Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) 6358-6363.</p>
査読無し 論文誌	<p>○ S. Kodaira, N. Hasebe, T. Doke, M. Hareyama, K. Sakurai, M.i Asaeda, S. Ota, N. Yasuda, H. Tawara and K. Ogura, "High performance particle detection system for trans iron isotopes in galactic cosmic rays", J. Phys. Conf. Series, 31 (2006) 221-222.</p>
査読付き 会議録	<p>○ S. Kodaira, N. Hasebe, T.Doke, M. Asaeda, A. Kitagawa, H. Kitamura, S. Sato, Y. Uchihori, N. Yasuda, K. Ogura and H. Tawara, "Beam experiment at HIMAC secondary beam course for the isotope separation of ultra-heavy nuclei in space", Proc. of the 18th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, (2004) 197-206.</p>
紀要及び 会議録	<p>小平聡, 長谷部信行、道家忠義、晴山慎、桜井邦朋、太田周也、安田仲宏、俵裕子、小倉絃一, 「CR-39 飛跡検出器による鉄核同位体弁別のための高精度厚さ測定法の開発」, 宇宙放射線, Vol. 5 No. 1 (2006) 67-76.</p> <p>小平聡, 長谷部信行、道家忠義、浅枝真行、安田仲宏、北川敦志、内堀幸夫、北村尚、俵裕子、小倉絃一, 「CR-39 飛跡検出器を用いた鉄核同位元素の質量分解能の評価」, 宇宙放射線, Vol. 4 No. 1 (2003) 53-65.</p>

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国際会議)	<p><u>小平聡</u>, 浅枝真行, 奥平修, 梶原延浩, 小林正規, 櫻井邦朋, 道家忠義, 長谷部信行, 晴山慎, 宮地孝, 山下直之, 安田仲宏, 「宇宙線重核中の同位体観測のための検出器開発」, 平成 16 年度大気球シンポジウム報告集, (2004) 158-161.</p> <p><u>紀要及び会議録その他、14 報.</u></p> <p>S. Kodaira, T. Doke, M. Hareyama, N. Hasebe, T. Miyachi, M. Miyajima, O. Okudaira, K. Sakurai, M. Takano, S. Torii, N. Yamashita, N. Yasuda, H. Tawara, S. Nakamura, K. Ogura, H. Shibuya, “Development of high performance particle detection system for ultra-heavy nuclei in galactic cosmic rays”, Int. Workshop on Cosmic-Rays and High Energy Universe, (Tokyo, Japan), Mar. 2007.</p> <p>S. Kodaira, M. Asaeda, T. Doke, M. Hareyama, N. Hasebe, K. Ogura, N. Yasuda, T. Tsuruta and Y. Kori, “Track detector of CR-39-DAP-copolymer with variable threshold to detect trans-iron nuclei in galactic cosmic rays”, The 23rd Int. Conf. Nucl. Tracks in Solids, (Beijin, China), Sep. 2006.</p> <p>S. Kodaira, T. Doke, M. Hareyama, N. Hasebe, T. Miyachi, M. Miyajima, O. Okudaira, K. Sakurai, M. Takano, S. Torii, N. Yamashita, N. Yasuda, H. Tawara, S. Nakamura, K. Ogura, H. Shibuya, “High performance solid-state track detector for the observation of trans-iron isotopes in galactic cosmic rays”, The 20th European Cosmic Ray Symp., (Lisboa, Portugal), Sep. 2006.</p> <p>S. Kodaira, T. Doke, M. Hareyama, N. Hasebe, S. Nakamura, K. Ogura, O. Okudaira, K. Sakurai, H. Shibuya, M. Takano, H. Tawara and N. Yasuda, “The Observation Program of Ultra Heavy Cosmic Rays by Means of Large Solid-State Track Detectors onboard the Long-Duration Balloon”, The 25th Int. Symp. on Space Tech. and Sci., (Kanazawa, Japan), Jun. 2006.</p> <p>S. Kodaira, N. Hasebe, T. Doke, M. Hareyama, K. Sakurai, M. Asaeda, S. Ohta, N. Yasuda, H. Tawara and K. Ogura, ”Development of particle detector for the observation of trans-iron isotopes in galactic cosmic rays", The 10th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, (Chiba, Japan), Sep. 2005.</p> <p>S. Kodaira, M. Hareyama, N. Hasebe, T. Miyachi, K. Sakurai, W.R. Binns, J.R. Cummings, M.H. Israel, J.T. Link, B.F. Rauch, L.M. Scott, S. Geier, R.A. Mewaldt, L.M. Barbier, J.W. Mitchell, G.A. de Nolfo, R.E. Streitmatter and C.J. Waddington, ”The attenuation length of cosmic-ray iron in the atmosphere obtained by TIGER experiment", The 19th European Cosmic Ray Symp., (Florence, Italy), Sep. 2004.</p> <p>S. Kodaira, N. Hasebe, T. Doke, M. Asaeda, N. Yasuda, A. Kitagawa, Y. Uchihori, H. Kitamura, K. Ogura and H. Tawara, ”Identification of Iron Isotopes using CR-39 Track Detector", The 28th Int. Cosmic Ray Conf., (Tsukuba, Japan), Aug. 2003.</p> <p><u>講演（国際会議）その他、11 件.</u></p>
講演 (国内会議)	<p><u>小平聡</u>, 太田周也, 佐藤匡, 桜井邦朋, 清水雄輝, 鷹野正利, 道家忠義, 鳥居祥二, 長谷部信行, 晴山慎, 宮島光弘, 宮地孝, 尾崎雄一, 亀井拓也, 中村正吾, 安田仲宏, 俵裕子, 小倉紘一, 渋谷寛, 「宇宙線中の超重核観測計画 4－高性能固体飛跡検出器の開発現状 1」, 日本物理学会 2007 年春季大会, 首都大学東京, 2007 年 3 月.</p>

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p><u>小平聡</u>, 長谷部信行, 晴山慎, 道家忠義, 桜井邦朋, 宮島光弘, 鷹野正利, 奥平修, 浅枝真行, 太田周也, 佐藤匡, 安田仲宏, 俵裕子, 中村正吾, 小倉紘一, 渋谷寛, 「銀河宇宙線中の超鉄核成分観測に向けた高性能粒子検出器システムの開発 II」, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 奈良女子大学, 2006 年 9 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 長谷部信行, 道家忠義, 太田周也, 安田仲宏, 小倉紘一, 俵裕子, 「CR-39 を用いた鉄核同位体弁別のための高精度厚さ測定法の開発」, 秋季第 67 回応用物理学学術講演会, 立命館大学, 2006 年 8 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 浅枝真行, 長谷部信行, 道家忠義, 安田仲宏, 小倉紘一, 鶴田隆雄, 郡佳伸, 「宇宙線中の超鉄核観測のための CR-39-DAP 共重合体による閾値可変型検出器の検討」, 秋季第 67 回応用物理学学術講演会, 立命館大学, 2006 年 8 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 長谷部信行, 晴山慎, 道家忠義, 桜井邦朋, 宮島光弘, 鷹野正利, 奥平修, 浅枝真行, 梶原延浩, 安田仲宏, 小倉紘一, 俵裕子, 中村正吾, 渋谷寛, 「銀河宇宙線中の超鉄核成分観測に向けた高性能粒子検出システム」, 日本物理学会 第 61 回年次大会, 愛媛・松山大学, 2006 年 3 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 長谷部信行, 道家忠義, 晴山慎, 桜井邦朋, 安田仲広, 小倉紘一, 俵裕子, 「銀河宇宙線中の超鉄核同位体観測に向けた検出器の開発」, 日本物理学会 第 60 回年次大会, 東京理科大学, 2005 年 3 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 長谷部信行, 晴山慎, 宮地孝, W.R. Binns, M.H. Israel, B. Rauch, TIGER collaboration, 「TIGER による、大気中での鉄核衝突平均自由行程の算出」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 高知大学, 2004 年 9 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 安田仲宏, 長谷部信行, 小倉紘一, 道家忠義, 俵裕子, 浅枝真行, 北川敦志, 佐藤眞二, 内堀幸夫, 北村尚, 「CR-39 飛跡検出器を用いた鉄核同位元素弁別能の評価」, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 安田仲宏, 長谷部信行, 小倉紘一, 道家忠義, 俵裕子, 浅枝真行, 北川敦志, 佐藤眞二, 内堀幸夫, 北村尚, 「CR-39 飛跡検出器を用いた Fe 核同位体分離に関する研究 (II)」, 春季第 51 回応用物理学学術連合講演会, 東京工科大学, 2004 年 3 月.</p> <p><u>小平聡</u>, 安田仲宏, 道家忠義, 長谷部信行, 俵裕子, 小倉紘一, 「CR-39 固体飛跡検出器を用いた Fe 核同位体分離に関する研究 (I)」, 春季第 50 回応用物理学学術連合講演会, 神奈川大学, 2003 年 3 月.</p> <p><u>講演（国内会議）その他、61 件.</u></p>
その他 (論文)	<p>S. Ota, <u>S. Kodaira</u>, N. Yasuda, M. Kurano, D. Shu, M. Hareyama and N. Hasebe, "Measurement of total charge changing cross section of iron nuclei in hydrogen using CR-39 track detector", Radiat. Meas., (投稿中)</p> <p>M. Hareyama, N. Hasebe, N. Kajiwara, M. Asaeda, M. N. Kobayashi, <u>S. Kodaira</u>, K. Sakurai, M. Fujii, T. Goka, H. Koshiishi and H. Matsumoto, "Helium isotopes in the radiation belt obtained by HIT onboard of Tsubasa", Int. J. Mod. Phys., A20 (2005) 6687-6689.</p> <p>H. Matsumoto, H. Koshiishi, T. Goka, M. Fujii, M. Hareyama, N. Kajiwara, <u>S. Kodaira</u>, K. Sakurai and N. Hasebe, "$\Delta E \times E$ Silicon telescope of energetic heavy ions trapped in radiation belts", Jpn. J. Appl. Phys., 44 (2005) 6870-6872.</p>